

不飽和シルトの排気・排水三軸試験結果に及ぼすセラミックディスクと微細多孔質膜との違い

不飽和三軸試験 セラミックディスク 微細多孔質膜 名古屋大学 国際会員 ○吉川高広 野田利弘 中井健太郎
非会員 高根澤巧也 中澤一眞

1. はじめに

不飽和土の三軸試験においては、間隙水と間隙空気の流れを分離し、サクシオンを制御するために、セラミックディスク（以後「ディスク」と略す）や微細多孔質膜¹⁾（以後「膜」と略す）が用いられる。ディスクは膜に比べて、空気侵入値（AEV）が大きく、高サクシオンまで制御できる一方で、透水性が低く、吸排水に長時間を要することが指摘されている²⁾。著者らも、ディスクを用いた不飽和シルト排気排水三軸試験³⁾の空気～水～土連成シミュレーション⁴⁾を通じて、ディスクの低透水性が不飽和シルト三軸供試体の吸排水を阻害し、試験結果に影響を与えることを示唆している。本研究では、小高ら³⁾の不飽和シルト排気排水三軸試験を参照して、ディスクおよび膜の両方を用いた実験を実施し、その解析も一部行うことで、ディスクと膜との違いが試験結果に及ぼす影響を改めて考察する。

2. 実験条件

参照した小高ら³⁾の実験の概要は次の通りである。

(i)含水比 20%になるように調整した非塑性シルト（DL クレー）を用いて、間隙比 1.14, 飽和度 46～47%の不飽和供試体を作製する（初期サクシオンは約 20kPa）。(ii)供試体を三軸試験機に設置し、非排水条件下でセル圧を 20kPa まで上昇させた後、セル圧と空気圧を同時に 250kPa 上昇させる。(iii)所定のサクシオンとなるように水圧のみを変化させ、その 15 分後にセル圧を 450kPa まで上昇させて、約 1 日間圧密させる。(iv)以上の過程を経た供試体を、様々な排気条件・排水条件下でせん断する。

本研究では、(iii)の過程において、サクシオン作用時と圧密時の放置時間を予め決めず、吸排水量が収束するまで時間をかけた。与えたサクシオン値は、膜の AEV を考慮して、0, 10, 30kPa の 3 ケースとした。(iv)の過程においては、側圧一定・排気排水条件下、上端から軸ひずみ速度 0.05%/min 一定でせん断した結果を示す。なお、供試体下端には微細多孔質膜¹⁾およびセラミックディスク（厚さ 3mm, AEV200kPa）を、供試体上端には撥水性のポリフロンフィルターを用い、間隙水と間隙空気の流れを分離している。また、供試体の体積変化は、内セルの水位変化から算出している。

3. 実験結果

サクシオン作用・圧密過程に関して、図 1 は膜を用いた場合、図 2 はディスクを用いた場合の実験結果を示す。図中の白抜き点は、セル圧を 450kPa まで上昇させる直前の点を示す。膜の結果とディスクの結果で、時間軸が倍半異なることに注意されたい。初期サクシオンは約 20kPa であったため、サクシオン 0, 10kPa 作用時は吸水、30kPa 作用時は排水する。サクシオン作用開始からセル圧上昇直前までの膜とディスクの結果を比較すると、ディスクは膜に比べて吸排水に長時間を要することを確認できる。特にサクシオン 0, 10kPa のときは、吸水による体積圧縮

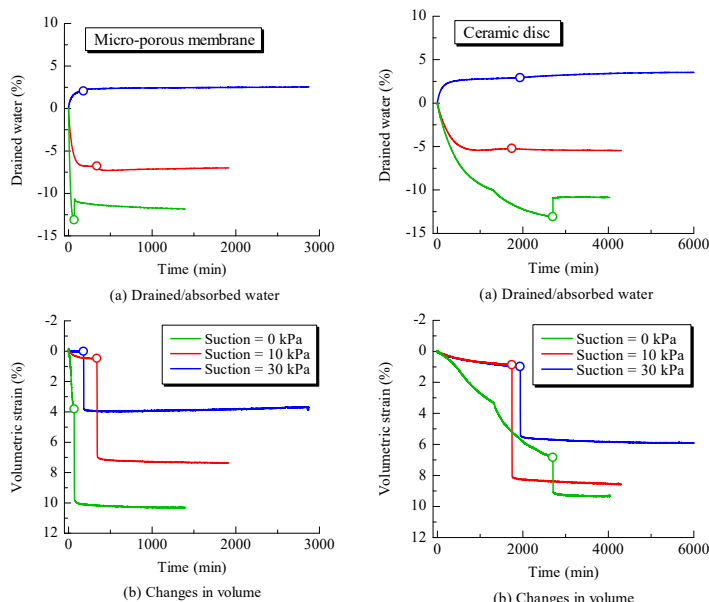
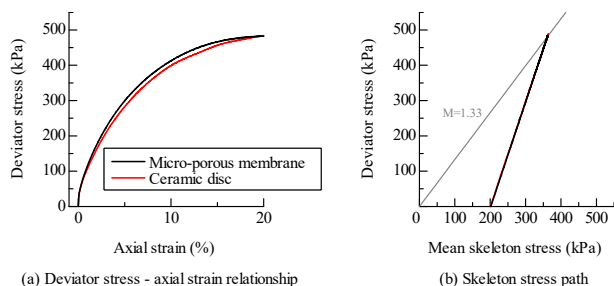


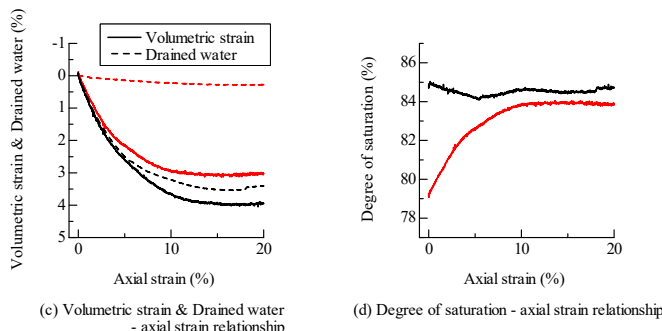
図 1 サクシオン作用・圧密過程（膜の場合）

図 2 サクシオン作用・圧密過程（ディスクの場合）



(a) Deviator stress - axial strain relationship

(b) Skeleton stress path



(c) Volumetric strain & Drained water - axial strain relationship

(d) Degree of saturation - axial strain relationship

図 3 排気排水せん断過程における膜とディスクの比較 (s=0kPa)

(コラプス)も長時間かけて生じている。一方で、吸排水量が収束した時点での両者の吸排水量および体積変化量は概ね一致している。よって、収束時の状態量を議論する場合は膜とディスクで大きな違いはないが、経時変化までを議論する場合は、同じ材料・状態の土供試体であっても、膜とディスクで力学挙動が大きく異なり、ディスクの低透水性が支配的となる点に十分注意する必要がある。

次に、排気排水せん断過程に関して、図3は、サクシオン0kPaの場合の膜とディスクの実験結果を比較した図である。(a)軸差応力～軸ひずみ関係と(b)骨格応力経路は両者でほとんど差がないが、(c)体積ひずみ・吸排水量～軸ひずみ関係を見ると、特に破線で示した吸排水量に関して、膜の場合は体積圧縮量の約85%の排水量であるのに対して、ディスクの場合は殆ど排水していない。したがって、(d)飽和度～軸ひずみ関係を見ると、膜の場合は飽和度変化がほぼ無いが、ディスクの場合は飽和度が約5%も上昇している。ディスクを用いた場合、今回実施した軸ひずみ速度では、せん断中に土が飽和度上昇する性質を持つと誤解する恐れがある。

図4はセラミックディスク単体の透水試験結果である。ディスクの上面と下面に圧力差(動水勾配)を与え、排水量の経時変化を計測して透水係数を算出した。その結果、ディスクの透水係数は約 1×10^{-9} m/sであり、既往の研究⁵⁾では、DLクレーの飽和透水係数が約 4×10^{-6} m/sと算出されているため、今回用いたディスクの透水係数は、不飽和シルト供試体の透水係数より小さいと考えられる。

最後に、セラミックディスクの透水性を考慮した空気～水～土連成解析⁶⁾を行った。図5は、解析に用いた有限要素メッシュ図と境界条件を示す。簡単のため、円筒供試体の軸対称性を仮定し、上下端は剛・摩擦のペDESTALの条件を表現するために束縛条件を課し、隅角部に変形の自由度を上げるための処理を施した。メッシュ下部に、厚さ0.3cmのディスクを二相系弾性体として表現し、透水係数は実験値である 1×10^{-9} m/sを与えた。材料定数等のその他の解析条件は別報⁷⁾と同じであるため、そちらを参照されたい。図6と図7はそれぞれ、サクシオン10kPa作用・圧密過程の実験結果と解析結果を示す。図7の膜の場合の解析条件は、図5で示した有限要素メッシュ図のディスク部分が無いだけで、その他は全く同じである。このように、ディスクの透水性考慮の有無だけで、膜とディスクの実験結果の時間的な違いを表現できることから、ディスクの低透水性が土供試体の吸排水を阻害していることがよくわかる。

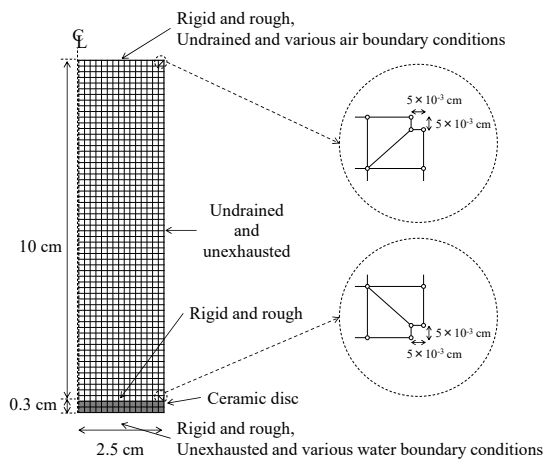


図5 有限要素メッシュ図と境界条件

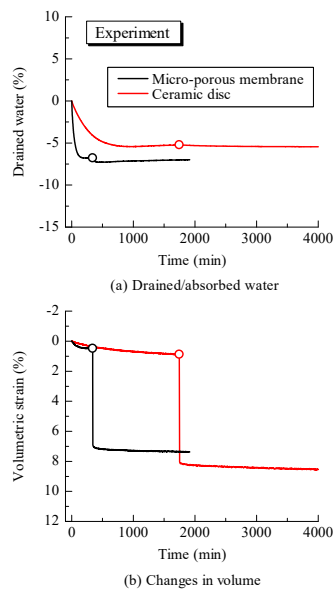


図6 サクシオン作用・圧密過程の実験結果 (s=10kPaの場合)

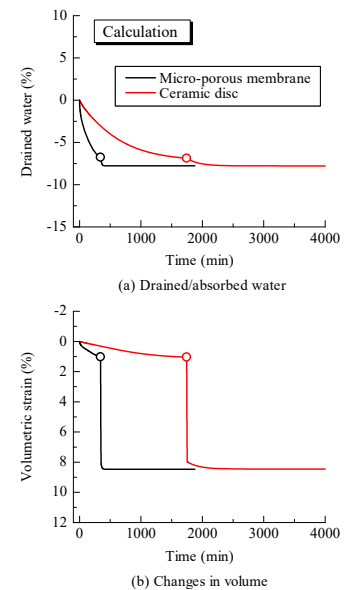


図7 サクシオン作用・圧密過程の解析結果 (s=10kPaの場合)

4. おわりに

低サクシオンで実験を行う場合は、微細多孔質膜¹⁾を使う方が余計な心配が少ない。セラミックディスクは不飽和土供試体よりも透水性が低い場合があり、土の時間依存挙動を調べる場合にも注意が必要である。

謝辞：JSPS 科研費 25249064 の助成を受けた。名城大学の小高猛司教授には、実験結果に関するご助言をいただいた。足利工業大学の西村友良教授には、実験装置に関するご助言をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献：1) Nishimura et al.: Microporous membrane technology ..., Geotechnical Testing Journal, the American Society for Testing and Materials, 35(1), 201-208, 2012. 2) 西村・古関：加圧膜法による..., 第47回地盤工学研究発表会, 681-682, 2012. 3) 小高ら：排気・排水条件を..., 第18回中部地盤工学シンポジウム, 6, 2006. 4) 吉川ら：セラミックディスクの..., 第51回地盤工学研究発表会, 705-706, 2016. 5) 横山・石田：蒸発法および..., 土木学会第56回年次学術講演会, 462-463, 2001. 6) Noda. and Yoshikawa: Soil-water-air coupled ..., S&F, 55(1), 45-62, 2015. 7) 野田ら：排気・排水三軸圧縮試験の..., 第52回地盤工学研究発表会, 2017 (本誌) .

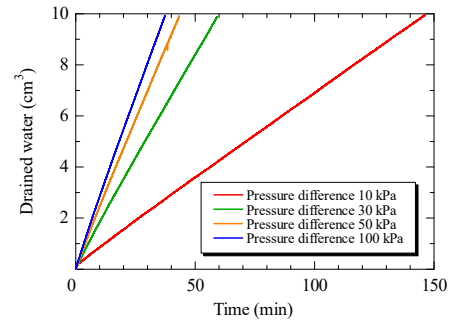


図4 セラミックディスクの透水試験結果